

La chimie face aux défis de la transformation du système énergétique

Sébastien Candel est professeur des universités Émérite à CentraleSupélec, membre honoraire de l'Institut Universitaire de France et vice-président de l'Académie des sciences. Il est également membre de l'Académie des technologies, de l'Académie de l'air et de l'espace, et membre étranger de la National Academy of Engineering des États-Unis.

1 L'énergie : notions fondamentales et enjeux

1.1. L'énergie, une notion scientifique fondamentale

Énergie, un terme du langage courant, une notion scientifique fondamentale qui joue un rôle technique majeur. L'énergie, c'est **la capacité à effectuer un travail**, par exemple soulever une masse – mais l'énergie intervient dans beaucoup d'autres situations –, et elle est essentielle pour toutes les activités. Lorsqu'on se nourrit, on absorbe environ 2 500 kilocalories ou 3 kWh (kilowatts.heure) par jour. L'énergie (électrique uniquement) que nous consommons chaque année en France, soit

540 milliards de kWh, correspond à 22 kWh de consommation par habitant et par jour¹.

C'est l'énergie qui permet d'extraire les métaux des minerais, de fabriquer du ciment à partir du calcaire, du verre à partir de la silice, etc. Sans énergie, pas de machines, de robots, de voitures, de trains, d'avions, de fusées, pas d'eau potable au robinet, pas de chauffage, de médicaments, peu de nourriture pour la planète, pas de téléphones portables, d'ordinateurs, d'Internet, etc.

1. 540 milliards kWh/66 millions d'habitants en France = 8 180 kWh d'énergie électrique consommée par chaque Français par an. 8180 kWh/365 jours = 22 kWh d'énergie électrique consommée par jour par chaque Français, en moyenne.

1.2. L'énergie existe sous différentes formes

L'énergie se présente sous des formes diverses : mécanique, électrique, chimique, calorifique, électromagnétique (par exemple sous la forme du rayonnement solaire), nucléaire. On sait passer d'une énergie à une autre. Ainsi par exemple, l'énergie solaire est transformée en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. L'énergie potentielle d'une masse d'eau stockée derrière un barrage (Figure 1) peut être convertie en énergie cinétique au moyen d'une chute, puis transformée en énergie élec-

trique au moyen d'une turbine hydraulique et d'un alternateur (voir l'**Encart** : « **Combien d'énergie une chute d'eau de cent mètres fournit-elle ?** »).

L'énergie cinétique du vent permet de faire tourner les éoliennes (Figure 2), entraînant des alternateurs, qui transforment l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. La puissance disponible varie comme la vitesse du vent au cube. S'il n'y a pas beaucoup de vent, il n'y a pas beaucoup de puissance ; au contraire, s'il y a trop de vent, l'éolienne ne résistera pas à la vitesse de rotation et il faut l'arrêter.

Figure 1

Une masse d'eau stockée derrière un barrage possède une énergie potentielle. La chute de cette eau au travers d'une turbine, qui entraîne un alternateur, produit de l'énergie électrique.

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-2.5, David Monniaux.



Figure 2

L'énergie cinétique du vent peut entraîner le rotor d'une éolienne, et, par un générateur, produire de l'énergie électrique. Il faut pour cela que le vent souffle suffisamment fort – mais pas trop fort quand même.



COMBIEN D'ÉNERGIE UNE CHUTE D'EAU DE MILLE MÈTRES FOURNIT-ELLE ?

L'énergie n'est pas quelque chose de facile à obtenir. On suppose un débit de 10 tonnes par seconde (soit 10 m^3 ou 10 000 litres par seconde) qui s'écoulent dans les conduites forcées, et on obtient une puissance de 100 MW, soit une énergie de presque 1 milliard de kWh – environ 0,2 % de l'énergie consommée en France en un an sous forme d'énergie électrique.

Quelques ordres de grandeur pour le calcul de la puissance

$$\mathcal{P} \approx \text{débit masse} \times \text{accélération de la pesanteur} \times \text{dénivellation}$$

Débit volume : $10 \text{ m}^3/\text{s}$

Débit masse : 10 t/s

Accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Dénivellation $h = 1\,000 \text{ m}$

$\mathcal{P} \approx 100 \text{ MW}$

Conclusion : il faut des débits d'eau considérables et de fortes dénivellations pour obtenir une puissance de 100 MW (le dixième de la puissance d'une tranche de centrale nucléaire).

1.3. Le facteur de charge et le rendement dans les transformations d'énergie

Il est important d'introduire la notion de « facteur de charge ». Ce facteur est défini comme le rapport de l'énergie effectivement obtenue sur une période de temps à l'énergie qu'on obtiendrait à pleine puissance 100 % sur cette même période. Pour les énergies renouvelables intermittentes, ce facteur de charge dépend essentiellement de la météorologie, du régime des vents pour l'énergie éolienne et de l'ensoleillement pour le photovoltaïque. Ainsi, pour l'énergie éolienne, le facteur de charge est de 18 % en Allemagne, 24 % en France (**Tableau 1**), calculé en moyenne sur l'ensemble de toutes les éoliennes actuellement en fonctionnement. Pour le solaire, le facteur de charge n'est que d'environ 10 % du fait de l'alternance jour/nuit et des heures où le Soleil est caché par les nuages et où l'éclaircissement est réduit.

Tableau 1

Comparaison des facteurs de charge pour l'éolien terrestre et le solaire photovoltaïque en Allemagne et en France.

	Allemagne	France
Éolien terrestre	18 %	24 %
Solaire photovoltaïque	10 %	13 %

Toutes les transformations de l'énergie sont aussi caractérisées par un rendement. On sait par exemple qu'il existe un rendement maximum, le rendement de Carnot, lorsqu'on transforme de la chaleur en énergie mécanique. Le rendement correspondant est quantifié par le « principe de Carnot », énoncé par Sadi Carnot en 1824 (**Figure 3**).

Aujourd'hui dans le monde, 80 % de l'énergie est fournie par la combustion de combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon). La chaleur dégagée par la combustion est transformée en énergie mécanique dans des moteurs thermiques ou dans des tur-

Figure 3

A) Sadi Carnot, physicien et ingénieur français, est reconnu pour ses travaux qui ont posé les bases de la thermodynamique ; B) le mémoire de Carnot sur la puissance motrice du feu, publié en 1824, introduit la notion de rendement dans les transformations d'énergie. Dans toutes ces transformations, l'énergie suit le principe de la conservation de l'énergie. Mais la partie utile n'est qu'un pourcentage de ce qui était disponible : il y a toujours un rendement dans toutes les transformations.

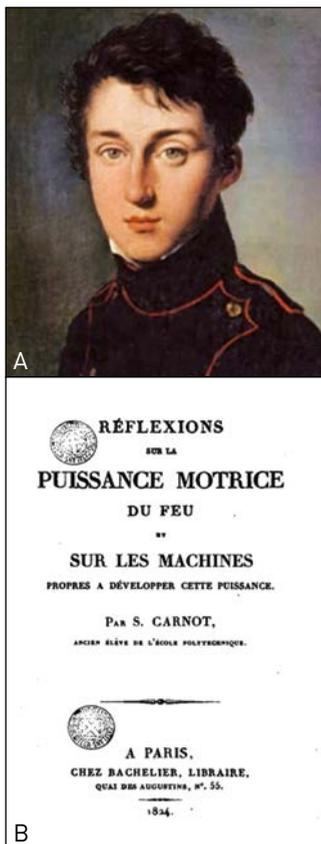


Figure 4

La combustion des matières fossiles (pétrole, gaz, charbon) produit de l'énergie thermique, que l'on sait transformer en énergie mécanique. 80 % de l'énergie est actuellement obtenue des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz). Cette énergie permet de faire voler les avions, lancer des fusées, rouler les voitures...

Source : Wikipédia, licence CC-BY-2.0, DLR German Aerospace Center.



On peut ainsi faire voler des avions et lancer des fusées (Figure 4).

2 Le défi de la transition énergétique

Un des grands défis posés aux sociétés actuelles est de trouver les moyens de limiter le recours aux énergies fossiles. Les solutions disponibles actuellement pour se passer des énergies fossiles sont loin de pouvoir répondre à ce besoin. Trouver des solutions alternatives va demander des efforts scientifiques, technologiques, industriels considérables, un défi que le chimiste Nathan Lewis, du California Institute of Technology, met en relief en notant que : « *L'énergie est le défi technologique le plus important que l'humanité ait à affronter aujourd'hui. Rien en science ou en technologie ne s'en approche...* » (Nathan Lewis, "Powering the planet", *Engineering and Science*, Caltech, n°2, 2007).

2.1. La consommation mondiale d'énergie

Un des problèmes essentiels dans l'analyse de la question énergétique est celui de la démographie. La population mondiale a augmenté rapidement depuis deux siècles et cette croissance n'est pas terminée (Figure 5). La plupart des prévisions indiquent que la population de la planète, actuellement de 7 milliards d'individus, va passer en 2050 à environ 10 milliards d'habitants. La demande d'énergie va donc augmenter en proportion.

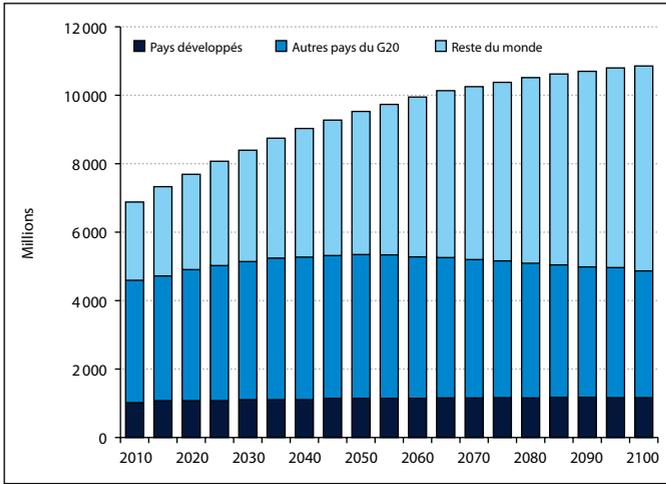


Figure 5

L'augmentation de la demande énergétique est liée à la croissance démographique (ici d'après le modèle intégré global du MIT), qui pourrait atteindre dix milliards en 2050. Elle est également liée à la hausse de la demande énergétique associée au développement économique et à l'augmentation des besoins des pays émergents ou en voie de développement.

Source : J.M. Reilly, 2015, The Bridge, NAE.

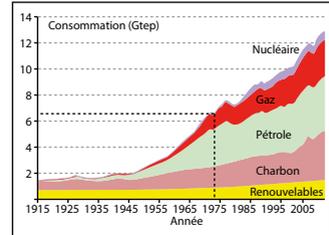


Figure 6

Évolution jusqu'en 2013 des parts de diverses sources d'énergie au niveau mondial.

Source : d'après J.P. Favennec et Y. Mathieu, Atlas mondial des énergies, Armand Colin, 2014.

La consommation mondiale d'énergie a doublé en quarante ans, elle croît à un rythme d'environ 2 à 3 % par an (Figure 6) et elle a surtout conduit à une augmentation des énergies fossiles (gaz, pétrole, charbon).

Quelques chiffres permettent de se faire une idée des ordres de grandeur globaux. La puissance installée actuellement dans le monde correspond à une énergie d'environ 13 Gtep (gigatonnes d'équivalent pétrole) par an en énergie primaire, soit 546 Exa Joules par an (1 Exa = 10¹⁸). On peut en déduire le niveau de puissance correspondant qui est de l'ordre de 17 TW. Par comparaison, le Soleil déverse sur la planète une puissance colossale de 122 000 TW environ – mais cette puissance est

bien loin d'être utilisable (voir l'**Encart : « Quelques ordres de grandeur »**).

Les évolutions données à la Figure 6 pour la consommation d'énergie indiquent qu'il

QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR

En 2013, la consommation d'énergie primaire mondiale était de 13 Gtep.

1 kg de pétrole correspond à 42 MJ

1 tep correspond à 42 GJ

L'énergie primaire totale correspond donc à 546.10¹⁸ J, soit 546 EJ (Exa Joules)

La puissance correspondante est obtenue en divisant l'énergie primaire totale par le nombre de secondes dans une année :

$$P = \frac{E}{T} = \frac{546 \cdot 10^{18}}{86\,400 \times 365} = 17,3 \text{ TW}$$

Cette puissance peut être comparée à celle que le Soleil déverse sur la Terre qui est de 122 000 TW.

sera difficile d'infléchir les évolutions tendancielle de la consommation d'énergie dans le monde, car ces évolutions sont déterminées principalement par la démographie et par la recherche d'un niveau de vie meilleur dans tous les pays émergents.

2.2. Quelques éléments sur les émissions de CO₂ pour éclairer les enjeux

Un des objectifs pour l'avenir est de réduire les émissions de CO₂ issues de la production d'énergie pour réduire les effets de serre associés et éviter un réchauffement global excessif. La **Figure 7**, tirée d'une analyse réalisée par la compagnie BP, considère trois catégories de pays : les pays de l'Union européenne, ceux de l'OCDE, et les autres. On observe que l'Europe est en train de réduire sa consommation pour des raisons qui sont à la fois économiques (les

délocalisations industrielles) et politiques, et qu'en 2035 elle ne représentera plus que quelques pourcents de la consommation mondiale. Ses émissions de CO₂ seront alors très faibles. Par contre, les autres pays du monde vont augmenter leur consommation d'énergies fossiles, et donc leurs émissions de CO₂. Cette augmentation compensera largement toutes les réductions qui pourraient être réalisées en Europe. Quels que soient les efforts qui pourraient être déployés dans cette partie du monde, ils seront compensés par la croissance des émissions des autres pays et on peut en conclure que l'Europe ne devrait pas chercher à n'importe quel prix à être leader dans un domaine (celui de la réduction des émissions de gaz à effet de serre), dans lequel de toute manière sa part est déjà des plus faibles.

2.3. Éléments de comparaison

Le **Tableau 2** montre les indices d'émission de CO₂ de quelques pays à titre de comparaison. Les États-Unis ont un indice important de 16 tonnes de CO₂ par habitant et par an. La Chine est déjà à plus de 6 tonnes de CO₂, et elle prévoit d'atteindre un niveau de 10 tonnes de CO₂ en 2030 avant que ce niveau ne soit amené à baisser au-delà de cette date. En Allemagne le niveau d'émissions dépasse les 9 tonnes de CO₂ par habitant. En France le niveau se situe autour de 5,1. Une « performance » qui tient à deux causes : d'une part l'activité

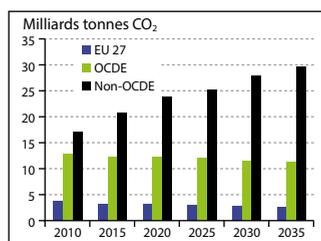


Figure 7

Prévisions d'émissions de CO₂ pour l'Europe des 27, l'OCDE, et les pays qui ne font pas partie de l'OCDE (adapté de BP). Les émissions de CO₂ de l'Union européenne continuent de baisser, celles du reste du monde augmentent. Le niveau des émissions des pays européens ne serait, en 2035, que de l'ordre de 6 % du total.

Tableau 2

Indice d'émission de CO₂ par an et par habitant. Il est nécessaire que l'objectif de réduction des émissions soit partagé par tous, notamment par les plus gros émetteurs.

	Population (Millions)	Émissions de CO ₂ (Mt)	Indice d'émissions de CO ₂ (tCO ₂ /habitant)
États-Unis	314	5074,14	16,15
Chine	1358	8521	6,07
Allemagne	81,92	755,27	9,21
France	65,43	333,89	5,1

Source : d'après Key world energy statistics (2014) International Energy Agency.

industrielle s'est réduite, et d'autre part, 75 % de l'énergie électrique est produite par le nucléaire, qui est une énergie décarbonée. La France est ainsi en bonne position par rapport aux émissions de CO₂ (Figure 8), juste derrière la Suède, où l'électricité est d'origine hydraulique ou nucléaire, et dans les deux cas décarbonée.

Ces données font bien ressortir les effets favorables de l'énergie nucléaire dans le domaine des émissions de gaz à effet de serre. Ces effets sont aussi mis en évidence dans une comparaison de l'évolution respective des énergies primaires utilisées en France et en Allemagne (Figure 9). L'énergie primaire en France provient à 53 % des

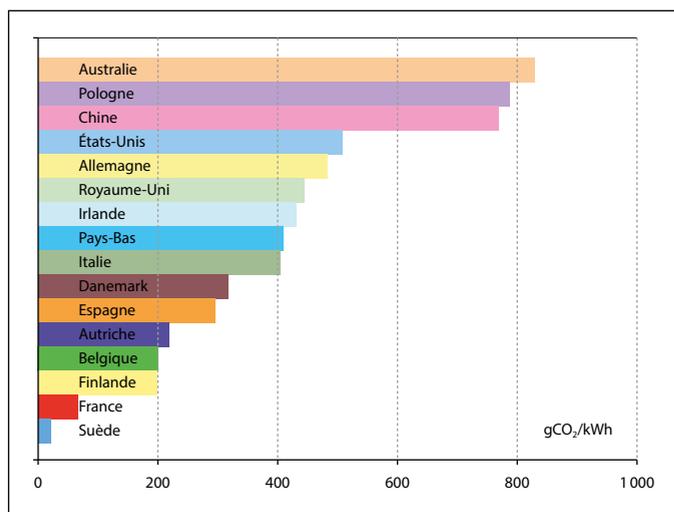


Figure 8

Émissions en gCO₂ par kWh pour l'année 2011. L'énergie électrique en France est faiblement carbonée.

Source : données IEA, CO₂ emissions from fuel combustion highlights, édition 2013.

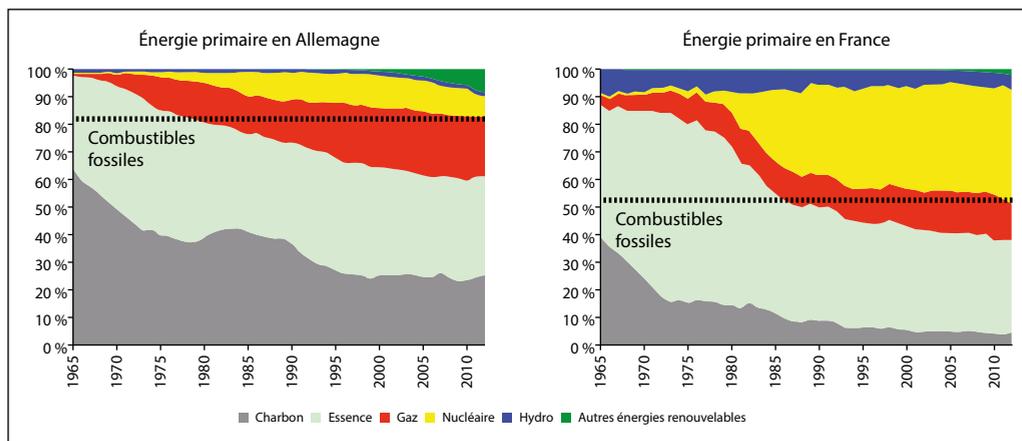


Figure 9

En Allemagne, l'énergie primaire est fournie à plus de 80 % par des combustibles fossiles contre 53 % en France, où 75 % de l'énergie électrique provient du nucléaire.

Source : données BP.

énergies fossiles, alors que l'Allemagne, malgré l'effort qui est fait pour développer les énergies renouvelables, dépend à plus de 80 % des énergies fossiles.

3 Les défis à relever dans le domaine des énergies renouvelables

La réduction des émissions de CO₂ nécessite le recours à des énergies décarbonées ou l'utilisation de méthodes de capture et stockage du CO₂ émis (CCS ou Carbon Capture and Storage). On pense alors immédiatement au déploiement à grande échelle d'énergies renouvelables, essentiellement éolien et solaire, et au développement de méthodes de stockage du CO₂ émis par les centrales fossiles. Ces deux moyens se heurtent cependant à des problèmes considérables qu'on va rapidement évoquer, qui sont le

passage à l'échelle, l'intermittence, la faible concentration des renouvelables et l'insertion dans le réseau.

3.1. Le problème du déploiement à grande échelle

On sait que le déploiement à grande échelle d'une installation ou d'un procédé industriel s'effectue toujours en plusieurs étapes : on commence par un prototype de laboratoire et on monte progressivement jusqu'à l'échelle 1. Cette progression d'échelle devrait par exemple être réalisée pour les procédés de capture et de séquestration du CO₂, une des possibilités envisagée pour réduire les émissions (voir aussi le **Chapitre de M. Fontecave**, qui traite des possibilités de recyclage du CO₂ dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016). Aujourd'hui, les expériences qui conduisent

à la séquestration du CO₂ sont effectuées à très petite échelle ; les déployer à grande échelle (avec comme objectif de multiplier les capacités par 10 000) réclamerait évidemment des efforts considérables (Figure 10). D'une façon plus générale, le déploiement à grande échelle de technologies qui pourraient permettre la réduction des émissions de gaz à effet de serre demandera le même type d'évolution progressive.

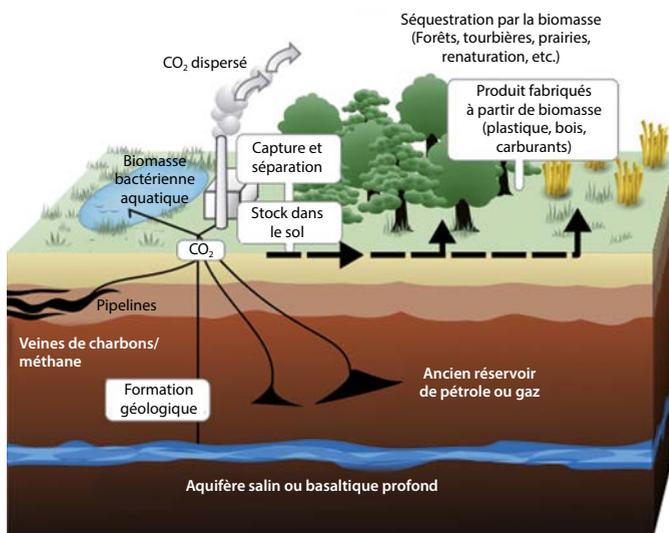


Figure 10

Les plateformes pétrolières commencent à se doter de la technologie CCS (Carbon Capture and Sequestration) ; le CO₂ produit sur la plateforme est réinjecté entre une couche de roche ultra saline et une roche couverture.

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-3.0,

3.2. Intermittence, dilution, intégration dans le réseau

Le déploiement des énergies renouvelables doit tenir compte de leur intermittence et de leur caractère diffus (leur forte dilution spatiale). Pour l'énergie éolienne par exemple, le facteur de charge est de 23 % (voir plus haut et le **Chapitre d'Y. Bréchet** dans *Chimie et changement climatique*). La Figure 11 reprend des données RTE (le gestionnaire du Réseau de Transport

d'Électricité) pour janvier et mai 2015, pour la production d'énergie électrique d'origine éolienne en France. On voit qu'elle est éminemment variable et pratiquement impré-

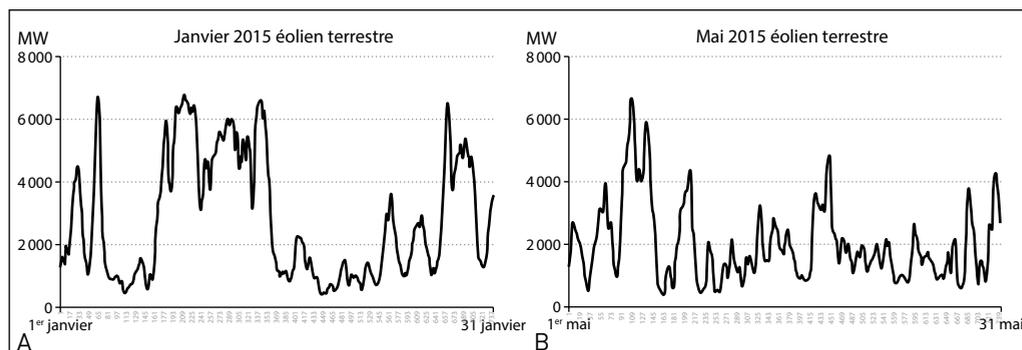


Figure 11

L'énergie produite par les éoliennes est extrêmement variable à l'échelle d'un mois (A : janvier et B : mai 2015, en France). La capacité de puissance éolienne installée en France au 1^{er} janvier 2015, légèrement supérieure à 9 000 MW, n'est jamais atteinte en réalité.

Source : données RTE.

visible. Il y a des périodes où le vent souffle et d'autres où il est pratiquement absent ; sur les 9 000 MW installés, on obtient des niveaux de 2 000 MW, ou des valeurs plus élevées de l'ordre de 6 000 MW, mais qui n'atteignent jamais les valeurs installées.

En moyennant les puissances produites sur toute l'Europe, on s'attend à un effet de « lissage ». Cet effet apparaît à la **Figure 12**, qui donne une vision de ce que pourrait être la puissance disponible au niveau européen en 2030 si on installait une puissance éolienne de 187,5 GW. Le calcul est réalisé en prenant les données disponibles dans sept pays européens pour les mois de novembre et décembre 2010 et en extrapolant au niveau de puissance nominale visé. On voit que le lissage n'est que très partiel car les régimes de

vent sont fortement corrélés en Europe. Cette simulation indique que le niveau de puissance reste inférieur à 15 % de la puissance installée pendant une dizaine de jours, ce qui nécessiterait de disposer de capacités de compensation pour répondre à la demande malgré la faiblesse de la production renouvelable.

L'introduction à grande échelle des énergies renouvelables intermittentes en remplacement des systèmes actuels de production d'électricité ne va pas pouvoir se faire sans poser des difficultés majeures. Cette insertion ne devrait être réalisée qu'avec beaucoup de prudence et après avoir bien pris la mesure des difficultés qu'elle va induire (voir l'**Encart** : « **Remplacer le nucléaire en France par les énergies renouvelables ?** »).

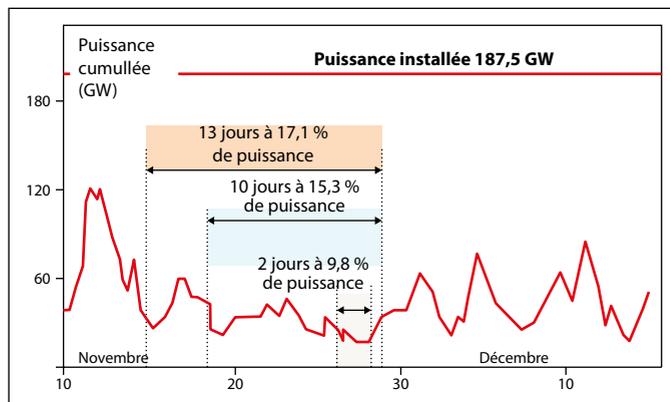


Figure 12

Puissance éolienne cumulée en GW sur un mois (novembre/décembre 2010) qu'auraient sept pays européens pour une puissance éolienne en 2030 qui serait triple de l'actuelle (187,5 GW au lieu de 65 GW). Les sept pays sont : Allemagne, Autriche, France, Espagne, Danemark, Irlande, Royaume-Uni.

Source : adapté de H. Flocard & JP Pervès, *Intermittence et foisonnement de l'électricité éolienne en Europe* (2012).

REEMPLACER LE NUCLÉAIRE EN FRANCE PAR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES ?

Regardons le scénario : **descendre la production d'électricité par le nucléaire de 75 % à 50 %, et compenser cette diminution par les énergies renouvelables.**

L'examen des ordres de grandeur montre que :

- l'opération demanderait des surfaces considérables (**Tableau 3**) : il faudrait l'équivalent de la totalité de la surface de l'Île de France. Certes, on peut aussi utiliser des surfaces situées en dessous d'éoliennes, mais avec beaucoup de limitations ;
- le coût serait voisin de 300 milliards d'euros, en utilisant des systèmes éoliens et photovoltaïques optimisés. Ces calculs viennent de la revue *Problèmes économiques* (Grand D., Le Brun C., Vidil R. (2014). *Peut-on (vraiment) réduire la part du nucléaire ? Problèmes Économiques*, Octobre, p. 20-30).

Tableau 3

Comparaison en termes de surface de terrain et de coût des différentes énergies renouvelables envisagées pour remplacer le nucléaire en France pour aboutir à 50 %).

	Éolien terrestre	Éolien mer	Solaire photo-voltaïque	Thermique
Surface par GW installé (km ²)	142	80	32	0,32
Coût par GW installé (Md€)	1,99	3,33	3,74	1
Puissance à installer	50	19	35	42
Surface (km ²)	7092	1520	1 117	13
Coût (en G€)	99	63	131	42
Coût total				335 Md€

Par ailleurs, la gestion des réseaux électriques serait complètement bouleversée par l'existence de sources d'énergies aussi diversifiées et délocalisées. Les études prospectives proposent de faire appel au « numérique » (**Figure 13**) et aux possibilités ouvertes par les « réseaux intelligents » (voir le **Chapitre d'Y. Bréchet** dans *Chimie et changement climatique*).



Figure 13

Le « smartgrid » ou « réseau intelligent » peut aider à intégrer la production diffuse intermittente et éviter une déstabilisation du système électrique.

Source : Wikipedia, licence CC-BY-SA-3.0, JH Mora

3.3. La dilution des énergies renouvelables

La densité d'énergie que l'on peut produire par les éoliennes est limitée par leur efficacité, qui demande que ces

machines ne soient pas trop proches les unes des autres pour éviter des interactions entre les sillages respectifs et une réduction sensible du rendement (**Figure 14**).



Figure 14

Les éoliennes doivent être à distance les unes des autres pour fonctionner efficacement, ce qui explique la densité d'énergie relativement faible qu'elles peuvent produire.

Source : David McKay (2012).

La densité de puissance moyenne que l'on obtient dans ces champs d'éoliennes est typiquement de l'ordre de quelques watts par mètre carré (3 W/m^2). Les fermes d'éoliennes occupent de ce fait des surfaces importantes. Ainsi par exemple, le « Princess Amalia Wind Turbine Field » (Figure 15) produit 435 millions de kilowattheures, pour une capacité installée de 120 MW, et fonctionne



Figure 15

Le champ d'éoliennes offshore Princess Amalia aux Pays-Bas produit en moyenne une puissance de $3,5 \text{ W/m}^2$.

Source : Ad Meskens/Wikimedia Commons.

avec une densité de puissance moyenne de $3,5 \text{ W/m}^2$.

Si l'on voulait produire la totalité de l'énergie électrique consommée en France avec ce type d'éoliennes, il faudrait 1 241 champs équivalents à Princess Amalia, et cela nécessiterait une surface de $17\,000 \text{ km}^2$, soit une bande côtière de 5 km équipée d'éoliennes sur l'ensemble des côtes françaises (**Figure 16**) !

Pour le photovoltaïque, on est un peu dans la même situation : tout ce qui est installé aujourd'hui offre une densité de puissance moyenne de l'ordre de 5 W/m^2 (**Figure 17**). Les travaux des laboratoires (notamment ceux réalisés par les physico-chimistes) laissent espérer des accroissements importants des rendements. La valeur assez modeste donnée plus haut est typique des fermes photovoltaïques qui sont actuellement opérationnelles.



Figure 16

Pour produire la totalité de l'électricité consommée en France avec de l'éolien, il faudrait équiper la bande littorale française ($3\,427 \text{ km}$) sur une largeur de 5 km.

Le solaire s'est beaucoup développé dans de nombreux pays comme l'Espagne, mais aussi en Allemagne dans le cadre de son programme actuel de « transition énergétique ». On peut aussi noter l'exploit remarquable qui consiste à faire voler un avion équipé de cellules solaires et à réaliser un tour du monde avec ce véhicule (voir l'**Encart : « Les énergies renouvelables à la conquête de l'aéronautique ! »**).



Figure 17

La densité d'énergie produite par les panneaux photovoltaïque est faible, autour de 5 W/m^2 .

Source : David McKay (2012).

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES À LA CONQUÊTE DU SECTEUR AÉRONAUTIQUE !

Il est intéressant de rappeler l'expansion considérable de l'aéronautique (**Figures 18 et 19**), et tenter une comparaison avec l'avion Solar Impulse 2. Les avions transportent aujourd'hui 4 000 milliards de passagers kilomètres par an à des vitesses de 900 km/h !



Figure 18

En soixante ans, l'évolution du secteur aéronautique a été considérable : aujourd'hui, plus de 4 000 giga passagers.km sont transportés par an !

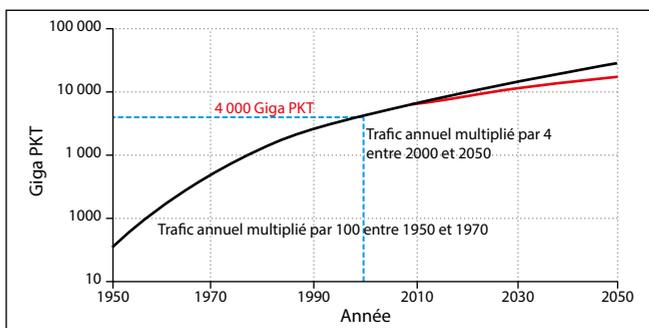


Figure 19

D'après les prévisions, le trafic annuel sera multiplié par quatre entre 2000 et 2050.

Le superbe avion solaire « Solar Impulse 2 » (**Figure 20**), qui fait actuellement le tour du monde, tire son énergie de cellules photovoltaïques. Avec ses 72 mètres d'envergure et ses 633 kg de batterie, Solar Impulse 2 s'est arrêté en juillet 2015 à Hawaï après une belle traversée de cinq jours et cinq nuits à une vitesse moyenne de 61,19 km/h.



Figure 20

L'avion Solar Impulse 2 est équipé de cellules photovoltaïques qui lui permettent de voler jusqu'à 100 km/h. Il a réalisé une traversée de 8 924 km du Pacifique depuis le Japon en cinq jours et cinq nuits.

Source : Solar Impulse/Revillard/Rezo.ch.

L'exploit de Solar Impulse 2 est remarquable, mais la « distance à l'objectif », qui serait d'assurer la totalité du trafic aérien avec des véhicules solaires, reste presque incommensurable (**Figure 21**) : elle nécessiterait un accroissement par un facteur 100 millions en nombre de passagers.kilomètres, et conduirait à remplacer tous les passagers par des pilotes de très haut niveau.

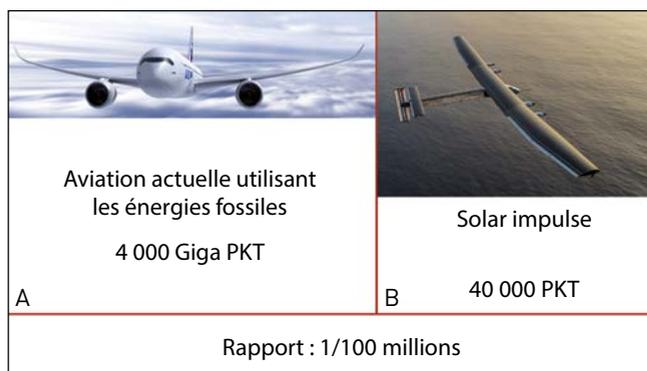


Figure 21

A) Aviation actuelle utilisant les énergies fossiles, 4 000 giga passagers.km transportés par an ; B) avion solaire Solar Impulse 2, 40 000 passagers.km transportés par an, soit 100 millions de fois moins que pour l'aviation utilisant les énergies fossiles.

4 Le rôle de la chimie dans la transformation du système énergétique

La chimie joue déjà un rôle considérable dans le domaine de l'énergie. C'est la chimie qui peut permettre :

- de **stocker de l'énergie** ou la récupérer par diverses méthodes : synthèse et utilisation d'hydrogène, récupération et utilisation du gaz carbonique CO_2 ;

- de **produire des biocarburants et des carburants de synthèse**. Ce sujet est notamment étudié à l'Institut Français du Pétrole Énergies Nouvelles (IFPEN) à partir des connaissances acquises dans le domaine du pétrole qu'il convient de transposer au traitement de la biomasse (**Figure 22**) ;

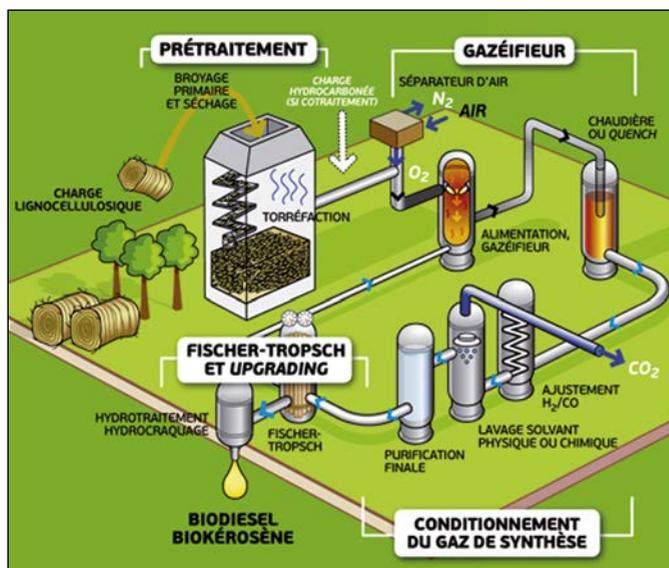


Figure 22

Le projet BioTfuel à Dunkerque : développement d'un nouveau procédé de production de biocarburants à partir de déchets agricoles rassemblant des organismes de R&D (IFPEN et le CEA) et des industriels (Axens, Sofiprotéol, Total et ThyssenKrupp Industrial Solutions).

Source : IFPEN.

- d'**élaborer de nouveaux matériaux** pour les cellules photovoltaïques, pour des super-condensateurs, des batteries, etc. (**Figure 23**) ;
- d'**améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et de la mobilité** (**Figure 24**).

Nous allons passer en revue quelques-uns de ces aspects dans ce qui suit.



Figure 23

De nouveaux matériaux doivent être développés pour l'énergie : l'entreprise française Saft conçoit des batteries de haute technologie pour l'industrie.

Crédit : Saft D. Edmunds CAPA Pictures.



Figure 24

De nombreux travaux sont menés sur l'amélioration de l'efficacité énergétique pour la mobilité et le bâtiment.

Source : IFPEN.

4.1. Le stockage de l'énergie

Les stations de transfert d'énergie par pompage

Le principal procédé de stockage de l'énergie électrique utilise le principe des Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Ce procédé utilise deux réservoirs (deux lacs) situés à des altitudes différentes mais en communication l'un avec l'autre. On fait chuter de très grandes quantités d'eau du lac supérieur sur une turbine pour récupérer de l'énergie ; du lac inférieur, on remonte l'eau dans le lac supérieur pour stocker l'énergie et l'utiliser ultérieurement. Le barrage de Grand'Maison (**Figures 25 et 26**) est un exemple de ce type d'installation. La France dispose d'une capacité totale de stockage de 4,9 GW, relativement faible par rapport aux 129 GW installés avec une durée de fonctionnement de l'ordre de la vingtaine d'heures correspondant à 34 GWh (à comparer aux 540 TWh de la consommation annuelle d'électricité).

Stocker l'énergie grâce aux batteries

Le stockage d'énergie au moyen de batteries est l'une des solutions les plus prometteuses (**Figure 27**). De nombreux laboratoires travaillent sur ce sujet, important en premier lieu pour les applications à la mobilité (transport automobile) mais aussi pour le stockage de masse de l'énergie. Pour cette dernière application, les batteries sont moins performantes que les STEP, mais les développements futurs pourraient changer cette situation.

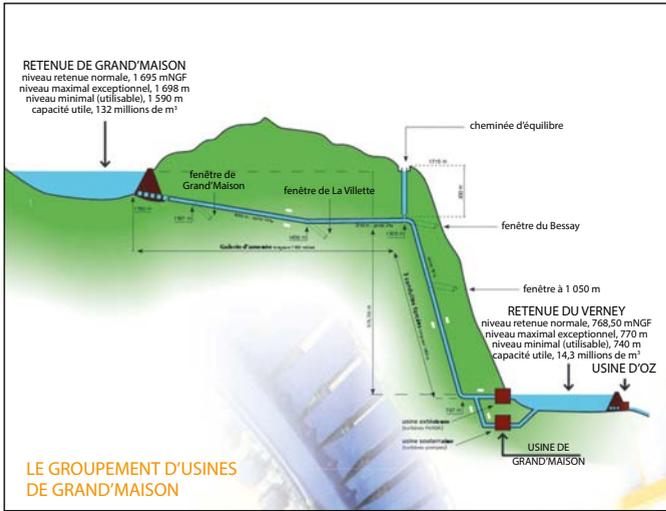


Figure 25

Dans une Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), lorsque la demande d'électricité est basse, le surplus d'énergie disponible est utilisé pour actionner une pompe qui permet de transférer de l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur, et inversement en cas de forte demande d'électricité.

Source : EDF.



Figure 26

Le barrage de Grand'Maison, un exemple de Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) en France.

Source : EDF.

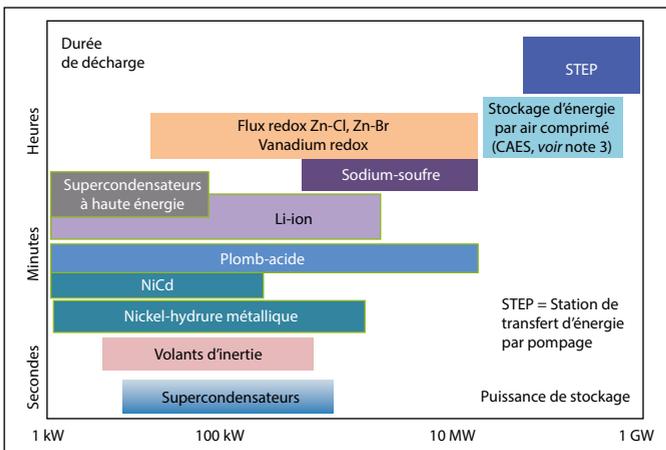


Figure 27

Comparaison des temps de décharge et des niveaux de puissance nominale pour diverses technologies de stockage de l'énergie électrique.

Source : d'après Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. (2011).

Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices, *Science*, 334 : 928-935.

La recherche sur les batteries pour le stockage de l'énergie est extrêmement active. Cependant, les principaux indices de performances, l'énergie par unité de masse et la puissance, restent encore relativement faibles (Figure 28). Les nombreuses qualités à priori des batte-

ries concernant leur facilité d'emploi justifient les efforts importants qui sont conduits. Les batteries Lithium-air² (Figure 29A) devraient à terme permettre d'atteindre des énergies par unité de masse beaucoup plus importantes que celles disponibles actuellement, mais elles ne sont pas encore suffisamment fiables. Une autre solution prometteuse est présentée par les « batteries à écoulement », qui utilisent des couples

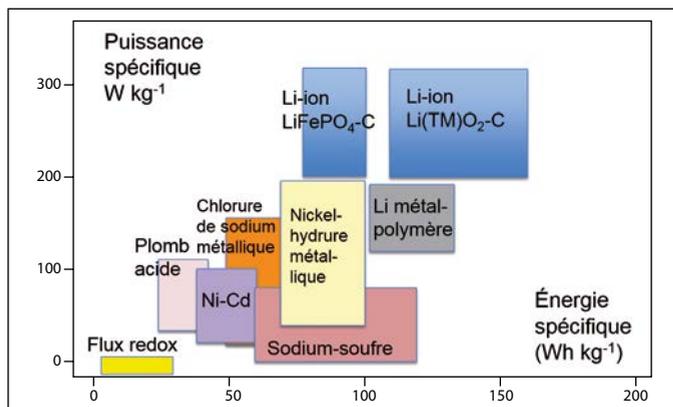


Figure 28

Densités de puissance et d'énergie massiques pour différents types de batteries. Les énergies et puissances par unité de masse restent faibles lorsqu'on les compare à celles des énergies fossiles.

Source : d'après Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices, *Science*, 334 : 928-935.

2. Batterie Lithium-air : batterie dans laquelle une électrode au lithium est couplée à une électrode de pile à combustible. Elle met en œuvre le couple lithium/dioxygène. Le dioxygène est disponible et inépuisable sans être stocké dans l'accumulateur. Cette batterie permet de concentrer une densité d'énergie massique de l'ordre de 1 000 Wh/kg, mais elle présente un verrou technologique majeur : la formation de superoxydes qui dégradent rapidement la batterie. Voir aussi : *Chimie et transports*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.

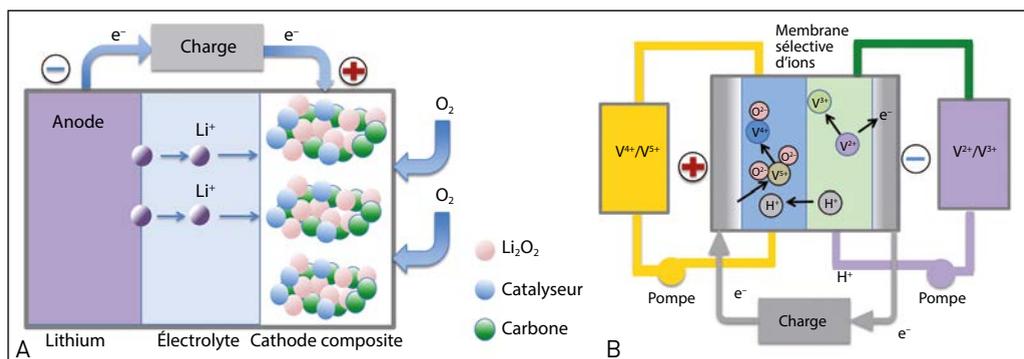


Figure 29

A) De nombreux travaux sont menés sur les batteries Lithium-air, dont le schéma de fonctionnement est donné ici, car l'énergie produite par unité de masse est beaucoup plus importante que pour les autres types de batteries ; B) les batteries à écoulement renouvellent l'électrolyte directement par pompage.

redox qu'on fait fonctionner en pompant directement les réactifs dans la batterie (Figure 29B) ; leur renouvellement s'effectue ainsi en continu. Cependant, les densités de puissance et d'énergie massiques sont relativement faibles.

Le stockage par le procédé « Power to Gas »

Dans le procédé de stockage dit « Power to Gas » (Figure 30), on utilise l'énergie excédentaire produite par les sources renouvelables pour

produire de l'hydrogène par électrolyse (voir le **Chapitre de P. Mauberger** dans *Chimie et changement climatique*). L'hydrogène peut ensuite être combiné à du gaz carbonique pour éviter que ce dernier ne rejoigne l'atmosphère ; on peut ainsi produire du méthane CH_4 , qui peut être stocké pour une réutilisation ultérieure.

La **Figure 31** représente l'installation de Falkenhagen en Allemagne. Cette installation d'une puissance de 2 MW uti-

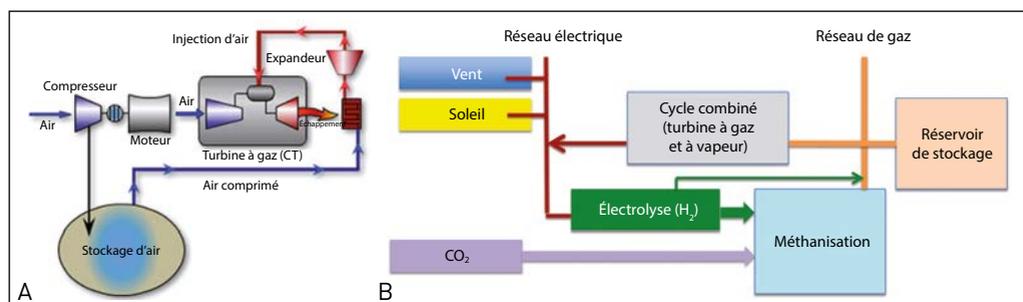


Figure 30

A) Le stockage d'air comprimé et l'utilisation d'une turbine à gaz permettent de stocker de l'énergie ; B) le « Power to Gas » est un type de stockage d'énergie : de l'énergie électrique renouvelable est convertie en hydrogène par électrolyse, et cet hydrogène peut ensuite être injecté dans le réseau de gaz ou converti en méthane ou gaz de synthèse.



Figure 31

L'usine de Falkenhagen en Allemagne utilise l'énergie éolienne et l'électrolyse (installation Hydrogenics) pour transformer l'eau en hydrogène, qui est ensuite injecté dans le système existant de transport de gaz naturel régional.

Source : Courtesy of Energy Storage GmbH

lise l'énergie éolienne pour électrolyser de l'eau et produire de l'hydrogène. Le rendement de l'opération est un peu supérieur à 50 %.

La situation mondiale des installations de stockage d'énergie électrique

La **Figure 32** résume la situation des installations de stockage en service dans le monde. Les STEP dominent largement ; les technologies du stockage à air comprimé avec de turbines à gaz pour récupérer de l'énergie³ sont

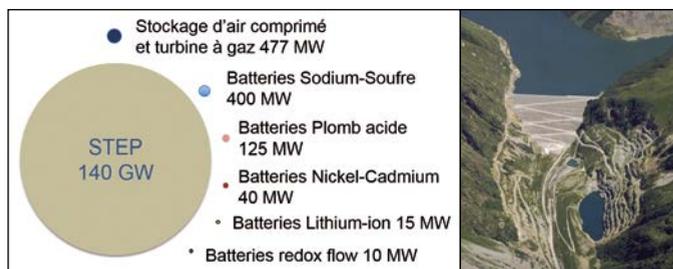


Figure 32

Comparaison du nombre de mégawatts installés des différents modes de stockage de l'énergie. Le stockage centralisé par STEP est actuellement environ trois fois moins cher par mégawatt installé qu'un système de stockage par batterie. La STEP de Grand'Maison (photo) a une capacité de stockage de 1,7 GW pendant 20h, soit 34 GWh (à comparer aux 540 TWh consommés par an).

3. Le principe du CAES (Compressed Air Energy Storage) repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé *via* un système de compresseurs à très haute pression (100 à 300 bars) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée *via* des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine.

également utilisées mais dans une moindre mesure. Quant aux procédés à batteries, on voit qu'ils sont encore peu développés, mais plusieurs systèmes sont essayés, signe de l'intérêt qui est porté à ces systèmes à plus long terme.

4.2. Les biocarburants

Lutter contre le changement climatique, c'est en particulier, et même surtout, réduire l'utilisation des combustibles fossiles. Le développement des biocarburants s'inscrit dans cette stratégie.

En partant de la biomasse (les végétaux), on étudie plusieurs procédés de synthèse d'hydrocarbures. Les procédés de « génération 2 » utilisent les déchets agricoles riches en lignocellulose⁴. La **Figure 33** rappelle les principales voies de transformation de la biomasse en biocarburant.

L'utilisation d'algues pour la production de biocarburants pourrait présenter beaucoup d'avantages économiques. Elle fait l'objet de recherches au niveau des laboratoires (**Figure 34**).

La **Figure 35** compare les économies faites par l'utilisation des biocarburants en matière

4. Lignocellulose : matière première présente dans les déchets agricoles (paille de blé, résidus d'élagage, déchets de bois de scierie...). Elle contient trois types de polymères, des molécules assez longues qui font la structure même de la plante : la cellulose (constituée de molécules de glucose attachées les unes aux autres), la lignine (qui rigidifie la plante), et entre les deux, des polymères à base de sucre appelés hémicelluloses.

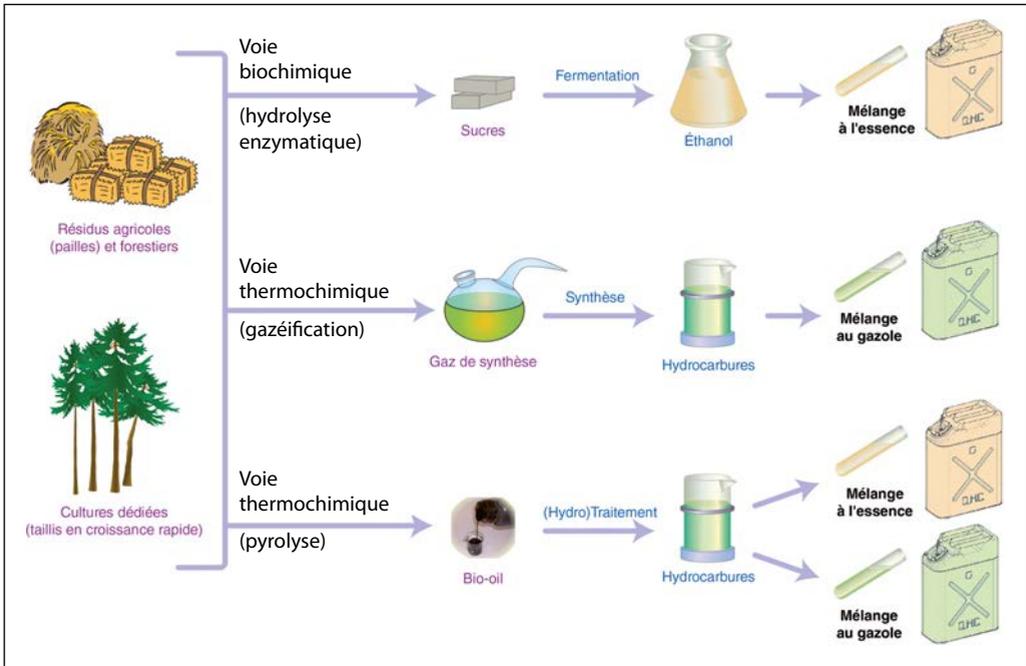


Figure 33

Les biocarburants de 2^e génération utilisent comme matière première des résidus agricoles et forestiers, des cultures dédiées (notamment de peupliers) et des déchets organiques (boues de stations d'épuration par exemple) pour produire de l'éthanol ou des hydrocarbures.

Source : IFPEN.

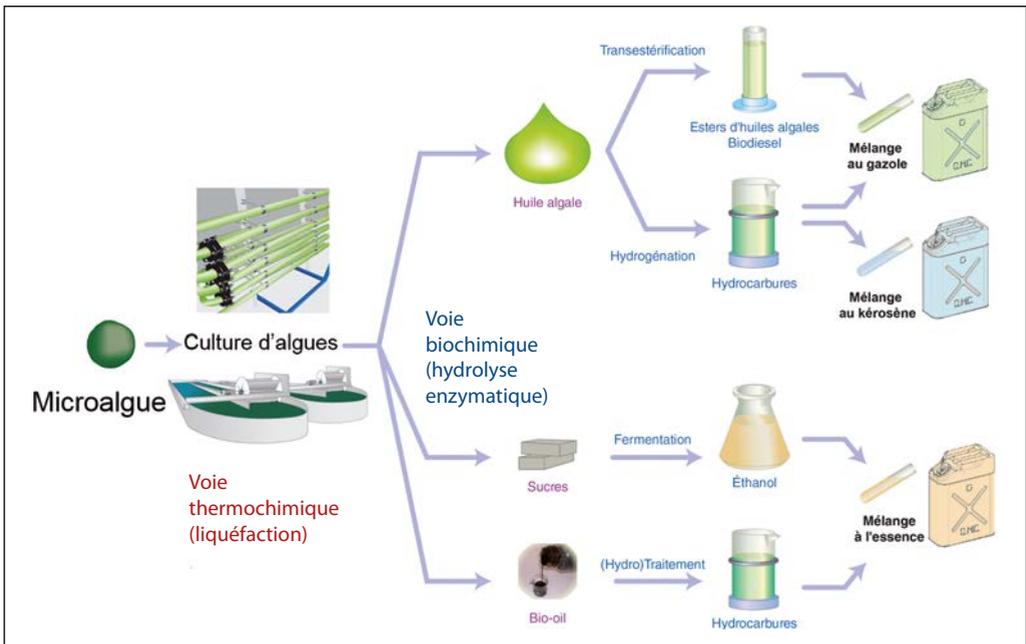


Figure 34

Encore au stade de la recherche en laboratoire, la production de biocarburants à partir d'algues pourrait être prometteuse à plus long terme.

Source : IFPEN.

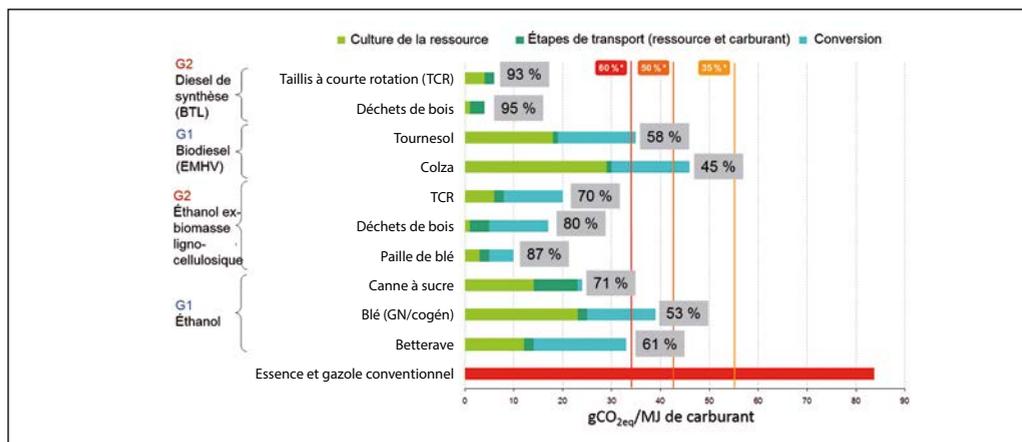


Figure 35

Réduction bilan de gaz à effet de serre (Well to Wheel) des biocarburants par rapport aux carburants fossiles de référence [83,8 gCO₂eq/MJ]. G1 = culture spécifique ; G2 = utilisation des déchets végétaux.

Source : directive 2009/28/CE, IFPEN.

de rejets de CO₂ dans l'atmosphère, selon la ressource végétale utilisée. Les procédés « génération 2 » sont de ce point de vue bien plus performants que les procédés qui font intervenir des cultures spécifiques (betterave, blé, canne à sucre de la génération 1).

4.3. La chimie et l'efficacité énergétique

La chimie joue un rôle majeur dans toutes les actions qui consistent à augmenter l'efficacité énergétique. On examine dans ce qui suit les progrès réalisés en aéronautique, dans le domaine automobile et dans celui des matériaux de construction.

4.3.1. Pour l'aéronautique

La consommation en carburant des avions a été réduite d'une façon sensible avec l'amélioration des moteurs,

l'allègement des structures des avions et l'augmentation des rendements aérodynamiques⁵ (Figure 36). Les avions actuels consomment de 3 à 5 litres par 100 km et par passager. Dans un avion qui vole et évolue à 900 km/h, on consomme aujourd'hui à peu près ce que l'on consomme dans une voiture.

Les progrès spectaculaires proviennent des développements réalisés sur les matériaux, l'aérodynamique et la propulsion (Figure 37). L'efficacité énergétique résulte d'un travail patient d'amélioration des performances à tous les niveaux.

5. Voir aussi *Chimie et transports, vers des transports décarbonés*, chapitre de S. Candel, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.

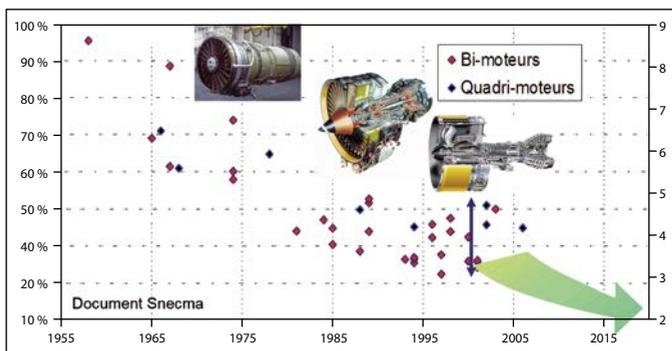


Figure 36

Évolution de la consommation des avions par passager.km (année de référence : 1955, indice = 100 %). Entre 1960 et 2000, les progrès technologiques ont permis de réduire la consommation des avions (donc la formation de CO₂) de 60 %.

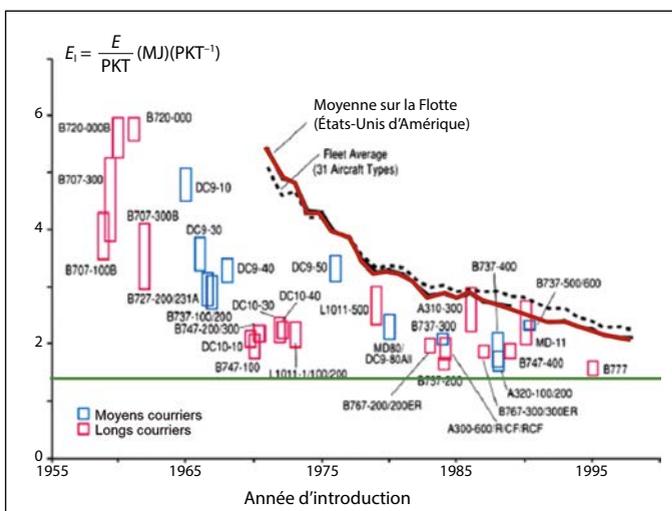


Figure 37

Évolution de l'indice énergétique global : des progrès considérables ont été réalisés par un travail sur les matériaux de construction des avions, sur l'aérodynamique et sur la propulsion.

Source : d'après Lee J.J. (2010). *Energy conversion management*, 51 : 189-196.

4.3.2. Pour l'automobile

L'efficacité énergétique est aussi un objectif permanent de l'industrie automobile. On vise des consommations de 2 litres aux 100 km dans les voitures équipées de moteurs classiques, en particulier par l'utilisation de nouveaux matériaux plus légers (Figure 38). Les véhicules électriques ou les véhicules hybrides (mixtes fioul/électricité) seront bien placés pour réussir ces objectifs d'économie de carburant et donc d'émission de CO₂ dans l'atmosphère (Figure 39).

4.3.3. Pour le bâtiment

Un gisement d'économie d'énergie est le domaine du bâtiment⁶. Les nouveaux matériaux isolants permettent de réaliser des progrès dans ce domaine : « matériaux », c'est-à-dire encore une fois « chimie » ! Celle-ci participe en effet à l'amélioration de la performance des matériaux de construction existants et à l'élaboration de nouveaux matériaux toujours plus per-

6. Voir aussi *Chimie et habitat*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.



Figure 38

Des réductions de consommation importantes peuvent être obtenues sur des véhicules classiques équipés de moteurs thermiques ou hybrides, comme les projets de véhicules basse consommation (ici un prototype de PSA Renault à 2L/100 km).

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-2.0, Ben from LONDON, United Kingdom.

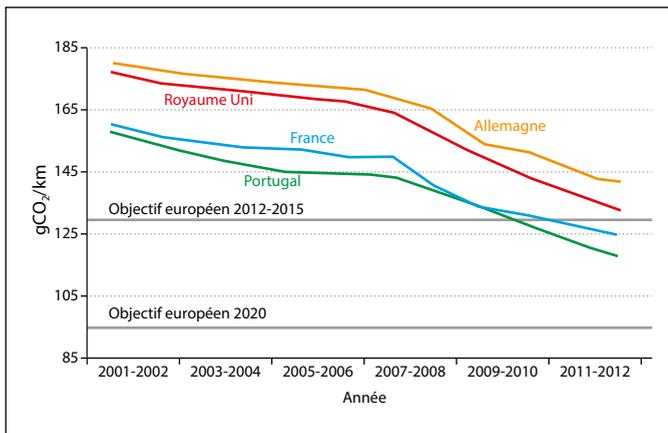


Figure 39

La tendance est à la baisse concernant les émissions de CO₂ par km pour les véhicules neufs dans quatre pays de l'Union européenne.

formants. L'objectif est de réduire la demande d'énergie par unité de surface des bâtiments neufs et anciens, et

pour cela d'assurer une meilleure isolation (Figure 40). Avec de nouveaux types de matériaux et de nouvelles configurations, on atteint des

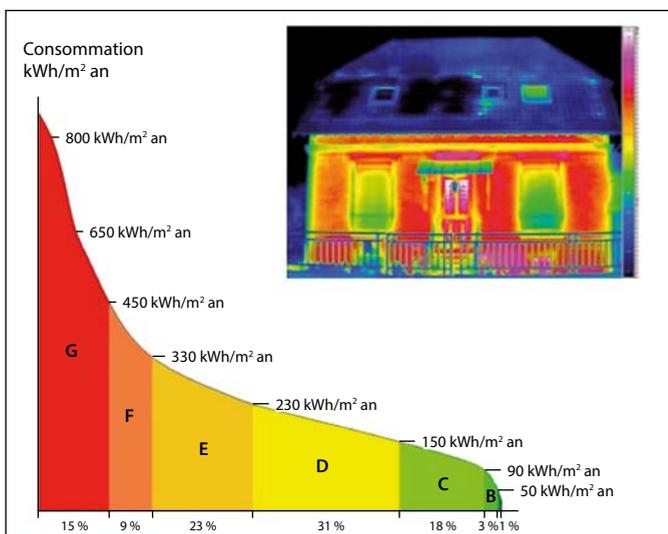


Figure 40

La lecture du diagnostic de performance énergétique, qui évalue la consommation d'énergie d'un bâtiment, est facilitée par une étiquette énergie à sept classes de A à G (A correspondant à la meilleure performance, G à la plus mauvaise).

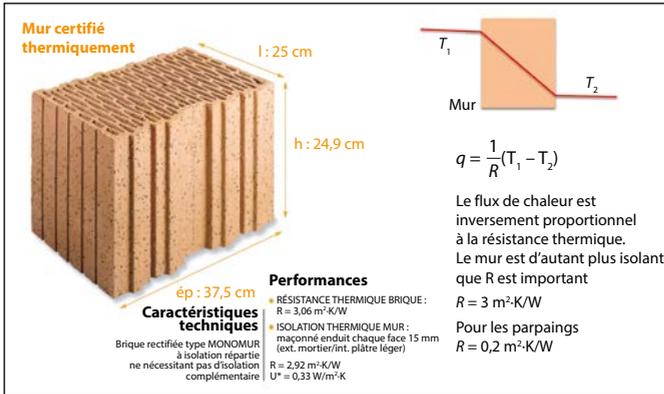


Figure 41

Plus la résistance thermique d'un mur est élevée, plus celui-ci est isolant. La résistance thermique de cette brique est de 3 m²·K/W, alors que celle d'un parpaing est de 0,2 m²·K/W.

résistances thermiques (Figure 41) de l'ordre de 3 m²·K/W quinze fois plus élevée que celles des matériaux habituels !

Engager de façon décisive un effort de recherche, développement, innovation et industrialisation dans le domaine de l'énergie

La transformation du système énergétique demande un effort considérable de recherche et développement qui puisse faire émerger des solutions innovantes pour régler des questions qui sont aujourd'hui très imparfaitement résolues. La chimie doit évidemment jouer un rôle majeur dans cet effort.

Utiliser toutes les ressources de la science et de la technologie ainsi que l'imagination et la créativité des chercheurs et des ingénieurs pour trouver des solutions, réaliser des innovations, concevoir des ruptures, constitue une impérieuse nécessité. Dans la transformation du système énergétique qu'il faut anticiper pour répondre aux risques du changement climatique, on peut affirmer clairement les rôles essentiels

et complémentaires de la science, de la technologie et de l'industrie.

Quelques références

- Mackay D. (2012). *L'énergie durable, pas que du vent !*, De Boeck.

- Mosseri R., Jeandel C. (2013). *L'énergie à découvert*, CNRS Éditions.

- Rapports récents de l'Académie des sciences : *La recherche scientifique face aux défis de l'énergie*, du Comité de prospective en énergie de l'Académie des Sciences, EDP Sciences, 2012 ; *Éléments pour éclairer le débat sur les gaz de*

schiste, Avis de l'Académie des sciences, 15 novembre 2013 ; Avis de l'Académie des sciences sur la transition énergétique, 6 janvier 2015 ; Déclaration conjointe sur la transition énergétique en France et en Allemagne, 10 juillet 2015 ; Avis de l'Académie des sciences *Changement climatique et transformation du système Énergétique*, 3 novembre 2015.

- Lee J.J. (2010). *Energy conversion management*, 51 : 189-196.

- Dunn B., Kamath H., Tarascon J-M. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, 334 : 928-935.